

속도 제한에 의한 충격량 도형에 관한 연구

An Analysis on the Robotic Impact Geometry with Task Velocity Constraint

이 지 흥
(Ji Hong Lee)

Abstract : This paper describes the effect of impact configurations on a single robot manipulator. The effect of different configurations of kinematically redundant arms on impact forces at their end effectors during contact with the environment is investigated. Instead of the well-known impact ellipsoid, I propose an analytic method on the geometric configuration of the impact directly from the mathematical definition. By calculating the length along the specified motion direction and volume of the geometry, we can determine the characteristics of robot configurations in terms of both the impact along the specified direction and the ability of the robot withstanding the impact. Simulations of various impact configurations are discussed at the end of this paper.

Keywords : impact, elliptical geometry, manipulability, impact configuration

1. 서론

로봇은 작업하는 환경에서 필요에 의해서나 또는 예상치 못하게 주변 물체와 접촉하거나 충돌하게 된다. 그래서 로봇과 주변 물체와의 충격량 해석이 로보틱스 연구에서 하나의 중요한 분야가 되고 있다. 이에 관한 중요한 연구로는 Wang과 Mason[3], Zheng과 Hemami[4] 등이 로봇이 주변 물체와 충돌할 때의 충격량을 수학적으로 분석한 바 있으며 Walker[1]가 기구학적 조작도 및 동력학적 조작도[5]의 해석 방법에 기초를 둔 충격량 조작도를 수학적, 기하학적으로 다루었다. 본 연구에서는 기존의 충격량 조작도가 가지고 있는 문제점을 분석하고 일반적으로 알려져 있는 조작도 타원과 다른 기하학적 충격량 도형을 소개하기로 한다.

Walker[1][2]는 $\Delta \dot{q}^T \Delta q \leq 1$ 이라는 충돌직전, 직후의 관절 각 속도의 변화량을 제약 조건으로 하여

$u^T J(q) K(q)^{-2} J(q)^T u \leq 1$ 이라는 동적 충격량 타원 (dynamic impact ellipsoid)을 정의하였으며 $\Delta \dot{q}^T K(q) \Delta \dot{q} \leq 1$ 으로 가중치가 추가된 관절 각속도 변화량으로부터 $u^T J(q) K(q)^{-1} J(q)^T u \leq 1$ 라는 일반적 충격량 타원 (generalized impact ellipsoid)을 정의하였다.

이 정의들에서 q 는 관절 각도, \dot{q} 는 관절 각속도, $\Delta \dot{q}$ 는 관절 각속도의 변화량, $J(q)$, $K(q)$ 는 자코비안 행렬 및 질량 행렬이다. 첫째 정의에 의한 타원은 각 관절의 충돌 직전, 직후의 관절 각속도의 변화량의 총합이 일정하다고 할 때 현 자세의 총력량이 작업공간에서 크기 분포가 어떻게 되는가를 나타내는 도형이고, 둘째 정의는 운동에너지의 변화량이 일정하다고 할 때 작업공

간에서 크기 분포가 어떻게 되는가를 나타내는 도형이라 할 수 있다. 이러한 도형이 사용자에게 의미를 갖기 위해서는 도형이 만들어지는 전제 제한 조건 $\Delta \dot{q}^T \Delta q \leq 1$ 및 $\Delta \dot{q}^T K(q) \Delta \dot{q} \leq 1$ 이 측정 내지는 제어 가능할 필요가 있으나 이상 제한된 두 도형의 관절 각속도의 변화량이나 운동에너지의 변화량은 사용자가 제어할 수 있는 양이 아니라는 문제점을 안고 있다. 그러므로 본 논문은 실질적인 전제 조건으로부터 새로운 임팩트 도형을 유도하고 앞서 언급한 도형들과의 상관 관계를 살펴보려 한다.

우선 본 연구에서는 충돌 직전 로봇의 작업기 끝이 움직이는 속도 v 에 제약 조건을 두어 임팩트 도형을 유도하려한다. 본 연구에서 설명하고자하는 도형은 $\|v\|_2 \leq 1$ 이라는 제약조건으로부터 운동 속도 방향이 정해져 있고 충돌면의 각도가 변하는 경우에 구해진 임팩트의 크기 분포, 충돌 면이 정해져 있는 경우에 운동 속도 방향이 변하면서 구해진 임팩트의 크기 분포를 나타내는 도형, 충돌면과 운동방향이 수직인 경우에 각 운동 방향으로 유도된 임팩트의 크기를 나타내는 도형을 유도하고 기존의 연구와 비교하여 본다.

일반적인 기존의 연구에서 조작도 도형을 구하는 방법은 주로 전제 조건이 되는 양을 구하고자 하는 조작도 변수의 함수로 표시하고 그 식을 제곱하여 $a^T a$ 꼴이 되게 하여 스칼라 양으로 만들어 한 번이 전제 제약조건의 크기가 되게 하여 상수화 함으로써 나머지 한 번이 조작도를 나타내는 도형의 수식이 되도록 하고 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 간접적인 방법을 사용하지 않고 충격량을 정의한 수식으로부터 도형의 형상을 해석하려 한다.

본 논문에서는 서론을 통해 본 연구의 개요를 소개한 데 이어 2장에서는 기존의 로봇 충격량에 대해 정의 및 유도 과정을 간단히 설명하겠다. 그리고 3장에서는 접촉 상황에 따른 두 가지의 충격량 도형을 구하는 과정을 설

명하겠다 그 다음으로는 기존의 충격량 도형과 본 연구에서 제안된 충격량 도형을 비교 분석하는 예제 및 결과에 대해 4 장에 기술하고, 마지막으로 5 장에서는 본 연구의 의의와 추후 연구과제에 대해 언급하였다.

II. 충격량

1. 충격량의 수학적 기술

이 장에서는 충격량 조작도를 나타내기 위해 [1]과 [2]의 방식을 토대로 수식 전개를 하겠다. 우선, n 개의 회전 관절을 갖는 로봇이 m 차원의 작업공간에서 작업을 하고 있을 때 이 로봇의 정기구학식을 다음과 같이 나타내기로 하자.

$$X = f(q) \tag{1}$$

여기서 $X \in R^m$ 는 m 차원의 공간상에서 작업하는 로봇의 위치 및 자세에 대한 정보를 나타내는 벡터이고, $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$ 는 로봇의 각 관절 각을 나타내는 벡터이다 미분한 뒤 약간의 조작을 거쳐 로봇의 각 관절 속도와 작업 공간상의 속도와의 관계를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$V = J(q)\dot{q} \tag{2}$$

여기서 $V \in R^m$ 는 작업공간에서의 속도벡터이고, $J(q) \in R^{m \times n}$ 는 자코비안 행렬, 그리고 $q \in R^n$ 는 관절 각속도를 나타내는 벡터이다. 이상의 기구학식 이외에 충격량 정의에 필요한 로봇 동력학 식은 다음과 같이 주어진다.

$$M(q)\dot{q} + C(q, \dot{q}) - [J(q)]^T F = \tau \tag{4}$$

여기서 $M(q)$ 은 $n \times n$ 질량행렬이고, $C(q, \dot{q})$ 는 전향력(Conolis force)과 원심력에 대한 정보를 가지고 있는 $n \times 1$ 벡터이고, $[J(q)]^T F$ 는 중력 및 로봇에 작용하는 외력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이며 τ 는 각 관절의 회전력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다.

이상의 수식을 기초로 Walker[1][2]가 정의한 충격량 도형을 유도하여보기로 한다. 충격이란 아주 짧은 시간 동안 일어나는 현상이라고 가정하면, F 라는 힘으로 두 물체가 서로 충돌하였을 때의 충격량 \hat{F} 는 수학적으로 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$\hat{F} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \int_t^{t+\Delta t} F(s) ds \tag{5}$$

따라서 로봇에 충격이 가해졌을 경우의 로봇 동력학 식은 (4)의 개념을 이용하여 다음과 같이 재정리된다.

$$\int_t^{t+\Delta t} [M(q)]\dot{q} ds + \int_t^{t+\Delta t} C(q, \dot{q}) ds + \int_t^{t+\Delta t} [J(q)]^T \hat{F} ds = \int_t^{t+\Delta t} \tau ds \tag{6}$$

여기서 로봇의 위치, 속도 그리고 토오르는 Δt 가 0으로 수렴할수록, 즉 극히 짧은 시간동안에는 거의 변화가 적으므로 무시하면 (6)를 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$[M(q)]\{\dot{q}(t+\Delta t) - \dot{q}(t)\} = [J(q)]^T \hat{F} \tag{7}$$

(6)에서 $q(t+\Delta t) - q(t)$ 를 Δq 라고 정의하고, (2)를 이용하면 (7)은

$$\Delta v = J(q)\Delta q = [J(q)][M(q)]^{-1}[J(q)]^T \hat{F} \tag{8}$$

과 같이 정리될 수 있다.

그런데 일반적으로 두 물체가 순간적으로 부딪힐 때의 동력학식은 다음과 같다.

$$[(V_1 + \Delta V_1) - (V_2 + \Delta V_2)]^T n = -e(V_1 + V_2)^T n \tag{9}$$

여기서 V_1 과 V_2 은 각각 물체 1과 2의 충돌하기 직전의 속도이고, $\Delta V_1, \Delta V_2$ 는 각각 물체 1과 2의 충돌한 바로 직후의 속도 변화, n 은 두 물체가 충돌하는 면에 수직인 방향, s 는 적분 변수 그리고 e 는 물체의 반발계수를 나타낸다. 그 다음 로봇이 충돌하는 면이 고정된 물체 2의 면이라 가정하면

$$V_2 = \Delta V_2 = 0 \tag{10}$$

(9)의 $\Delta V_1, \Delta V_2$ 를 (8)로 대치시키고, 몇 가지의 수식 전개 과정을 통해 다음과 같은 로봇 충격량 식을 얻을 수 있다

$$\hat{F} = \frac{-(1+e)v^T n}{n^T [C] n} \tag{11}$$

여기서,

$$C = J(q)M(q)^{-1}J(q)^T \tag{12}$$

이다.

2. 충격량 도형

[1]에서는 (8)을 이용하여 충격량 조작도에 관한 식을 다음과 같이 정의하였다.

$$\Delta \dot{q} = [M(q)]^{-1}[J(q)]^T \hat{F} \tag{13}$$

그리고 $\|\Delta q\|_2 = \Delta q^T \Delta q \leq 1$ 이라는 전제 제약 조건으로부터 동력학적 충격량 타원(dynamic impact ellipsoid)을 (14)와 같이 정의하였다.

$$u \in R^m \cdot u^T J(q)M(q)^{-2}J(q)^T u \leq 1 \tag{14}$$

결국 (14)는 충돌 직전과 후의 로봇의 관절 속도의 변화의 크기의 합이 주어졌을 경우에 이때 충돌면에 작용하는 충격량 값을 작업공간상에서 표현한 것이라 볼 수 있다. 그러나 (14)를 사용하는데 필요한 충돌 직후의 로봇 관절 속도 변화 범위는 충돌 상황에 따라 다르므로 알아내기 힘들어 로봇 충격량 조작도를 실제적으로 얻기에는 (14)는 부적합하고, 또 (14)는 결과적으로 (11)의 분모에 대한 어떤 특정한 상황에서의 타원을 그리는 것에 불과하다. 따라서 로봇의 주어진 기구학 및 동력학적 특성에 따른 작업공간상의 충격량 범위를 얻어내기에는 부적합하다.

또, Walker[1][2]에서는 $\Delta q^T \Delta M(q)q \leq 1$ 라는 전제 제약 조건으로부터 다음의 일반적 충격량 도형을 정의하

었다.

$$u \in R^m : u^T J(q) M(q)^{-1} J(q)^T u \leq 1 \quad (15)$$

여기서 이용된 $\Delta q^T \Delta M(q) \dot{q} \leq 1$ 는 제한된 운동에너지라는 물리적 의미가 있으나 이 또한 사용자가 제어할 수 있는 양이 아니라는 문제점이 있다.

III. 충격량 해석을 위한 새로운 도형의 해석

(11)에서 정의된 충격량 식은 로봇의 자세, 충돌 직전 작업기의 속도, 그리고 충돌 상황(운동 방향과 충돌 면과의 관계) 등의 함수임을 알 수 있다. 여기서는 앞서 언급한 두 종류의 충격량 도형과 달리 충격량의 정의로부터 직접 그 도형을 유도해 보기로 한다. 여기서 살펴 볼 경우는 다음의 3가지인데 모두 $\|v\|_2 \leq 1$ 이라는 전체 제약 조건하에서 구하기로 한다.

- i) 충돌 면(n)이 정해져 있는 상황에서 운동 방향(v)이 달라짐에 따라 구해지는 충격량의 범위,
 - ii) 운동 방향(v)이 정해져있고 충돌 면(n)이 달라짐에 따라 구해지는 충격량의 범위, 그리고
 - iii) 운동 방향(v)과 충돌 면(n)이 수직인 상황에서 운동 방향(v)이 달라짐에 따라 구해지는 충격량의 범위
- 1) 경우 1 : n 이 상수 벡터일 때 v 가 달라짐에 따라 구해지는 충격량 도형

이 경우는 그림 1과 같은 상황을 나타낸다.

로봇의 충격량은 $\hat{F} = \frac{-(1+e)v^T n}{n^T [C] n}$ 로 주어짐을 앞

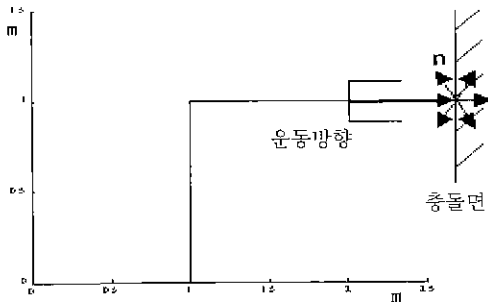


그림 1. 경우 1의 충돌 면과 로봇의 운동 방향.
fig. 1. Impact surface (n) and direction of robot (v) in case 1.

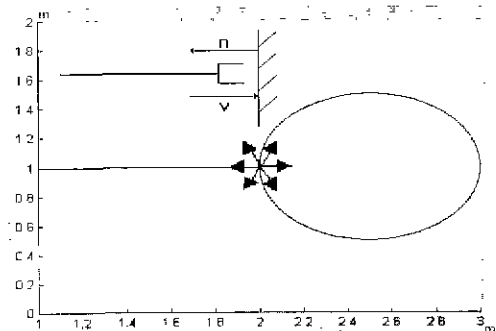


그림 2. 경우 1의 충격량 도형.
Fig. 2. Impact configuration in case 1.

서 설명한 바 있다. 여기서 n 이 상수이고 로봇의 자세가 주어져 있는 상황이므로 C 도 상수이고 따라서 분모는 상수가 된다. 그러므로 충격량 도형은 v 와 n 의 상관관계에 의해서만 결정된다. v 와 n 의 상관관계는 v 및 n 모두가 단위 벡터임을 상기하면

$$v^T n = \|v\| \|n\| \cos \theta = \cos \theta \quad (16)$$

가 되어 도형의 방정식은 A_1 이 상수일 때 다음 식이 되고 형태는 그림 2와 같은 형태의 도형이 됨을 알 수 있다.

$$\hat{F} = (A_1 n^T v) v, \|v\| = 1 \quad (17)$$

위의 식에서 v 는 충격량의 방향을, $(A_1 n^T v)$ 는 충격량의 크기를 나타낸다. 여기서 최대 충격량의 방향은 충돌 면에 수직인 방향 즉, n 방향임을 알 수 있다.

- 2) 경우 2 : v 가 상수 벡터일 때 n 이 달라짐에 따라 구해지는 충격량 도형

이 경우는 그림 3과 같은 상황을 나타낸다. 로봇의 충격량이 $\hat{F} = \frac{-(1+e)v^T n}{n^T [C] n}$ 으로 주어짐을 상기하면 이 도형의 해석은 다음과 같이 할 수 있다. 여기서는 n 이 변수이므로 분모가 더 이상 상수가 되지 않는다. 이 수식으로부터 도형을 유도하기 위해 먼저 $n^T [C] n = K, K$ 는 상수, 라는 도형에 대해 주목할 필요가 있다. 이 도형은 타원을 나타내는데 K 값이 커지면 타원의 크기가 커지게 된다. 그리고 이 타원의 특성은 C 를 특이값 분해 (singular value decomposition)[2][6]하면 알 수 있다 즉,

$$\text{when } C \in R^{m \times n}, \text{rank } C = k$$

$$C = U \Sigma V^T \quad (18)$$

로 분리된 3개의 행렬로 표시될 수 있는데 $U \in R^{m \times m}, V \in R^{n \times n}$ 은 직각 행렬(orthogonal matrices) 이고

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p) \in R^{m \times n} \quad (19-1)$$

$$p = \min\{m, n\} \quad (19-2)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k > 0 \quad (19-3)$$

$$\sigma_{k+1} = \dots = \sigma_p = 0 \quad (19-4)$$

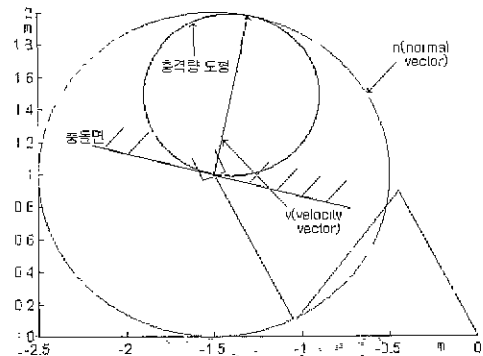


그림 3. 경우 2의 충돌면과 로봇의 운동 방향.
Fig. 3. Impact surface (n) and direction of robot (v) in case 2.

인 대각선 행렬(diagonal matrix)이다 여기서 주목할 것은 $n^T[C]n=K$ 라는 타원의 최장축(longest principal axis)이 n 공간에서 U 의 첫 번째 열 벡터 방향으로 σ_1 의 길이를 가지며 그 다음 긴 장축은 두 번째 열 벡터 방향으로 σ_2 만한 길이를 가지고, 이런 식으로 가장 짧은 축(shortest principal axis)은 k 번째 열 벡터 방향이며 그 길이가 σ_k 가 된다는 것이다.

이 타원의 식과 \hat{F} 와의 관계를 살펴보기로 한다. 먼저 그림 4를 보기로 하자. 그림 4에는 $\|n\|_2=1$ 이라는 도형과 다음의 3 타원이 그려져 있다.

$$n^T[C]n=K_1 \quad (20-1)$$

$$n^T[C]n=K_2 \quad (20-2)$$

$$n^T[C]n=K_3, K_1 \leq K_2 \leq K_3 \quad (20-3)$$

그림에서 보듯이 $K=K_1$ 일때는 분모의 타원이 단위원에 내접하고 $K=K_2$ 일 때는 거꾸로 단위원이 타원에 내접함을 알 수 있다 만약 $K < K_1$ 이거나 $K > K_2$ 인 타원 $n^T[C]n=K$ 는 단위원과 만나지 않게 된다. 즉, 길이가 1이면서 $n^T[C]n=K$ 를 만족하는 n 은 존재하지 않는다는 뜻이 된다. 그러므로 n 이 단위 원상을 움직이면 분모는 $K_1 \leq n^T[C]n \leq K_2$ 의 범위에 있게 된다. $K_1 \leq K \leq K_3$ 인 K 값인 경우는 그림에서처럼 타원 $n^T[C]n=K$ 과 단위원이 만나는 지점을 가리키는 벡터 n 을 $\hat{F} = \frac{-(1+e)Dv^T n}{n^T[C]n}$ 에 대입하면 이 값이 바로 벡터 n 방향의 충격량크기가 된다. 이상 설명한 충격량 도형을 벡터의 크기와 방향을 구분하여 표시하면 다음식과 같다

$$\hat{F} = \left(A_2 \frac{v^T n}{n^T[C]n} \right) n, \quad \|n\|_2 = 1, \quad A_2 \text{는 상수} \quad (21)$$

분모를 최대로 만드는 n 은 $n^T[C]n=K$ 라는 타원의 장축 방향과 일치하고 분모를 최소로 만드는 n 은 $n^T[C]n=K$ 라는 타원의 단축 방향과 일치하지만 이러한 n 들이 분자를 최대로 최소로 만드는 n 과 반드시 일치하는 것은 아니므로 이 경우의 최대 임팩트 방향을 아

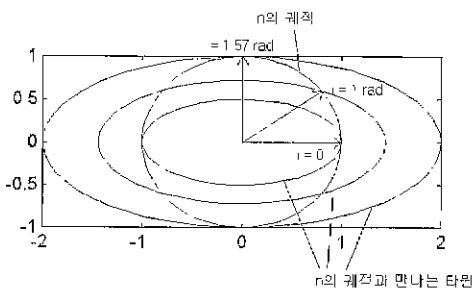


그림 4. 크기가 1인 원과 만나는 타원에 대한 예제 (장축과 단축에 대한 길이 비는 일정).
Fig. 4. Example of ellipsoids that cross unit circle.

는 것은 쉽지 않다. 다만 그림을 그려서 기하학적으로 분석하여 보면 최대 충격량이 나오는 충돌면의 방향은 $n^T[C]n=K$ 라는 타원의 장축방향이거나 주어진 v 방향 임을 알 수 있다. $v = [1, 0]^T$ 인 경우의 예가 그림 5에 나타나 있다

3) 경우 3 운동 방향(v)과 충돌 면(n)이 수직이면서 (v)이 달라짐에 따라 구해지는 충격량 도형 여기서의 로봇의 운동 방향과 충돌면이 수직인 경우를 생각해보자. 그러면 이 경우는 경우 2의 특별한 경우라 할 수 있다. 충격량이 $\hat{F} = \frac{-(1+e)v^T n}{n^T[C]n}$ 인데 $v^T n = 1$ 이므로 충격량은 크기와 방향을 나누어 다음 식으로 정리할 수 있다 단, A_3 는 상수이다.

$$\hat{F} = \left(\frac{-A_3}{n^T[C]n} \right) n \quad (22)$$

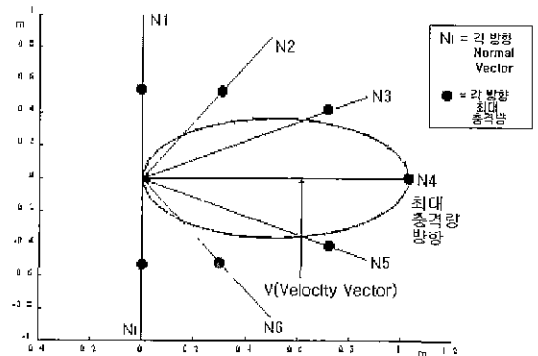


그림 5 경우 2의 충격량 도형.
Fig. 5. Impact configuration in case 2.

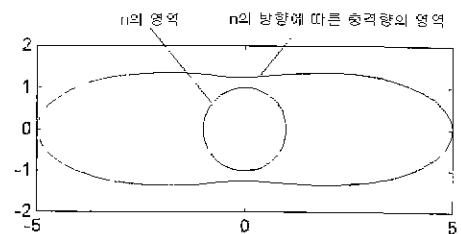


그림 6. 충돌 방향에 따른 충격량 도형의 예.
Fig. 6. Example of impact configuration in impact space.

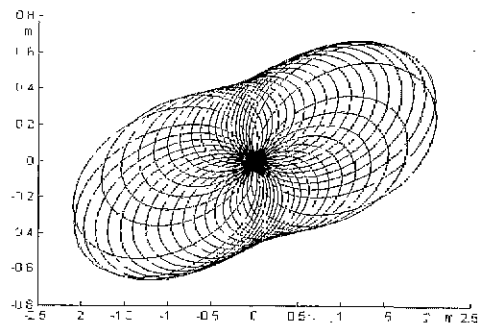


그림 7. 경우 2와 경우 3의 상관 관계
Fig. 7. Interrelation between case 2 and case 3.

이 경우는 해석이 비교적 간단한데, $n^T[C]n=K$ 라는 타원의 장축 방향이 최대 충격량 방향이 된다. 이 경우의 예가 그림 6에 나타나 있다.

경우 3은 경우 2의 특별한 경우로 경우 2의 최대 값들만 모아서 만들어진 도형이 된다 즉 그림 7에서 보듯이 경우 2에서 n 과 v 가 방향이 정반대인 경우의 충격량 값들을 모아서 만들어진 도형들의 경계선이 경우 3의 도형이 된다

IV. 예제

이 장에서는 3장에서 정의한 충격량 조작도 도형의 물리적인 의미에 대해 기존의 충격량 도형과 비교를 통해 검증하도록 하겠다. 여기서 분석에 사용되는 로봇은 2 차원에서 운동하는 3자유도 로봇으로 [1]에서 설정한 기구학적 동력학적 특성을 가진다. 이 로봇의 기구학적, 동력학적 계수들은 각 링크 길이는 (1.00, 1.00, 1.00)m으로 하였으며, 각 링크 무게는 (1.00, 1.00, 1.00)kg이다.

3 장에서 설명한 충격량 도형의 경우 중에서 첫 번째 두 번째 경우는 앞서의 예제로 충분하다고 보고 여기서는 경우 3에 대해 [1]에서 수행한 결과를 구하여 비교하기로 한다. [1]에서는 그림 8의 4가지 경우에 대해 충격량을 구했는데 그 결과가 표 1과 같다. 단, $n=(1, 0)$ 이고, $v=(1, 0)$ 이며 로봇 팔 끝의 좌표는 (0, 1)이다.

그리고 이 경우의 동력학적 충격량 도형과 일반적 충격량 도형 및 본 연구에서 제안된 경우 3의 충격량 도형이 그는 그림 9와 그림 10에 나타나 있다. 그리고 표 1의 충격량 결과를 보면 다음의 관계를 가지고 있음을 알 수 있다

$$Pos_A \geq Pos_B \geq Pos_C \geq Pos_D$$

그러나 [1]에서 제안된 그림 9의 두 충격량 도형을 보면

표 1. 4가지 경우에 있어서의 충격량
Table 1. Effect of 4 case on Contact Impulse Force.

Configuration	Impulse Strength
Case A	320
Case B	162
Case C	87
Case D	69

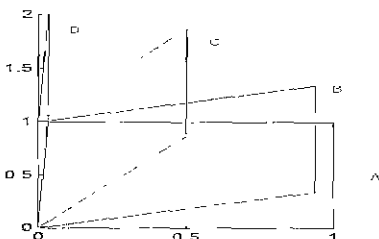


그림 8. 로봇의 각 자세에 따른 충격량 변화 예제.
Fig. 8. Effect of varying configurations on contact impulse force.

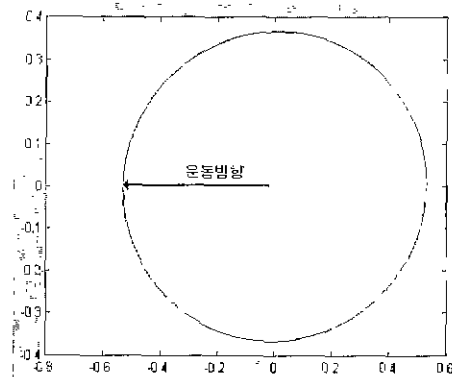


그림 9-(a) 그림 8의 자세 A인 경우에 기존의 충격량 타원.
Fig. 9-(a). Impact ellipsoids for the cases of postures A in figure 8.

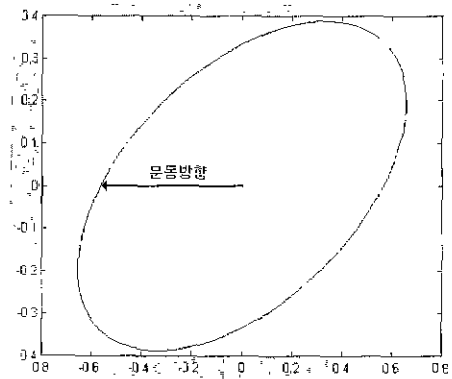


그림 9-(b) 그림 8의 자세 D인 경우에 기존의 충격량 타원.
Fig. 9-(b). Impact ellipsoids for the cases of postures D in figure 8.

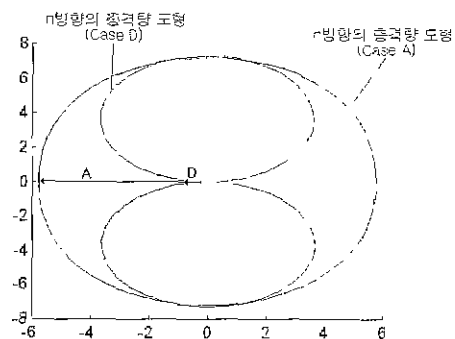


그림 10 자세 A와 D의 경우에 충돌 벡터 방향 변화에 따른 충격량 도형(제시된 방법).
Fig. 10 Impact configurations for the case of postures of A and D(Proposed Method).

그 도형들로부터 표 2의 충격량 값을 알아낼 수도 없을 뿐더러 (16)식의 대소관계도 불분명함을 알 수 있다. 즉, 그림 9-(b)를 보면 각 자세에 따라 로봇의 충격량이 최대가 되는 방향성을 알 수는 있지만 자세 A와 D의 경우에 서로 비교할 경우 자세 A가 D보다 (-1, 0)의 방향으로 더 큰 충격량을 낼 수 있다는 것을 확신할 수 없다.

그러나 본 연구에서 제안한 임팩트 도형인 그림 10을 보면 자세 A인 로봇이 D 자세를 갖는 로봇보다 (-1, 0)의 방향으로 훨씬 더 큰 충격량을 낼 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 로봇 팔 끝의 속도에 전체 제약조건을 가하여 새로운 충격량 도형을 유도하고 분석하였다. 제안한 충격량 도형은 충돌 면과 충돌 방향과의 상관관계에 의해 3가지 경우로 나누어 설명하였으며 관절 각속도의 변화량 등에 기초한 충격량 도형보다 운동 방향에 따른 충격량의 크기를 정확히 제시한다는 것을 예제를 통하여 보였다.

그러나 제안된 충격량 도형들은 현재 수치 해석적으로 구해지고 있어 도형의 부피 및 모양 등에 대한 해석적 정리와 로봇 충격량에 대한 로봇 특이 자세 등에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] D. Ian Walker, "The use of kinematic redundancy in reducing impact and contact effects in manipulation", *IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp 434-439, 1990
- [2] I. D. Walker, "Impact configurations and measures

for kinematically redundant and multiple armed robot systems." *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 10, no. 5, October, 1994.

- [3] Y. Wang, and T. Mason, "Modeling impact dynamics for robotic operations," *IEEE Conference of Robotics and Automation, Raleigh, NC*, pp. 678-685, April, 1987.
- [4] Y. F. Zheng, and H. Hemami, "Mathematical modeling of a robot collision with its environment," *Journal of Robotic Systems*, vol. 2, no. 3, pp. 289-307, 1985.
- [5] T. Yoshikawa, "Analysis and control of robot manipulator with redundancy," *Robotic Research, The First International Symposium, The MIT Press*, pp 735-747, 1984.
- [6] Y. Nakamura, *Advanced Robotics, Redundancy and Optimization*, Addison Wesley, pp 112-122, 1991.
- [7] J. Lee, "A study on the manipulability measures for robot manipulators," *IEEE/RSJ, IROS '97*, pp. 1458-1455, 1997.
- [8] R. V. Benson, *Euclidean Geometry and Convexity*, McGraw-Hill Book Company, pp 188-192, 1966.

이 지 흥

제어·자동화·시스템공학 논문지 제 3권, 제 5호, 참조.